



Investigation of the effect of drought stress on bioavailability and bioaccumulation of cadmium, copper, and iron in the Barley

Mohsen Madahinasab^{✉1}, Mohsen Mousavi nik², Ahmad Ghanbari³, Alireza sirousmehr⁴, Shapour kouhestani⁵

1. Corresponding Author, Department of Agricultural Science, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran, and Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: mohsenmadahinasab@gmail.com

2. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: mohsen_372001@yahoo.com.au

3. Department of Agroecology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: ghanbari@uoz.ac.ir

4. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: a_sirousmehr@yahoo.com

5. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Kerman, Iran. Email: shapourkouhestani@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 8, 2022

Received: May. 22, 2022

Accepted: May. 28, 2022

Published online: July. 23, 2022

Keywords:

Heavy metals,
Soil contamination,
Toxicity,
Translocation index,
Water deficiency.

The entry of heavy metals into the soil through fertilizers increases the risk of their transfer to the food chain by changing the pattern of cation accumulation in the plant under the water deficiency. In order to investigate the accumulation of cadmium, copper, and iron by barley, an experiment was conducted as a randomized complete block design with three water deficiency levels (irrigation at 100 (control), 75, and 50% of field capacity) and four sampling stages (each 15 days) in three repetitions in Jiroft region in 2018 and 2019. After harvest, the reduction of soil cadmium, copper, and iron concentrations were 52, 63, and 23%, respectively. Their concentrations in plant shoots were 66, 85, and 96% lower than the ones in roots, respectively. With increasing water deficit, the concentration of residual iron in the soil and shoots increased, and the concentration of copper in soil decreased and increased in roots and shoots, while the cadmium decreased in plant and soil. Copper root accumulation index was higher than one and increased with increasing water deficiency levels, with a significant difference of 6.82 times compared to the control. In the multivariate regression model of growth rate in growth periods, the largest share in explaining the variance of indices belonged to growth rates in the third and fourth fifteen-day periods. According to the regression between growth rate and the indices, with increasing growth rate, the copper accumulation index of roots ($\beta = -0.97$) decreased and the translocation index for cadmium ($\beta = 0.83$) and copper ($\beta = 0.86$) increased and for iron ($\beta = -0.94$) decreased linearly. In conclusion, under drought stress, none of the studied metals accumulated in the shoots. Although, the concentration of copper in the roots increased 3.31 times as compared to the soil, this increase did not lead any toxicity risk in the shoots.

Cite this article: Madahinasab, M., Mousavi Nik, M., Ghanbari, A., Sirousmehr, A.R., & Kouhestani, Sh. (2022) Investigation of the effect of drought stress on bioavailability and bioaccumulation of cadmium, copper, and iron in the Barley. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1111-1125.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340204.669226>



بررسی اثر تنش خشکی بر زیست‌فراهمی و قابلیت انباشت زیستی کادمیم، مس و آهن در جو

محسن مداحی‌نسب^۱، سیدمحسن موسوی نیک^۲، سید احمد قنبری^۳، علیرضا سیروس مهر^۴، شاپور کوهستانی^۵۱. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران و گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. mohsenmadahinasab@gmail.com۲. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. ایمیل: mohsen_372001@yahoo.com.au۳. گروه آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. ایمیل: ghanbari@uoz.ac.ir۴. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. ایمیل: a_sirousmehr@yahoo.com۵. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران. ایمیل: shapourkouhestani@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

ورود فلزات سنگین به خاک از طریق کودهای شیمیایی و آلی، ریسک انتقال آنها را به زنجیره غذایی از طریق تغییر الگوی انباشت کاتیونها در گیاه تحت تأثیر کم‌آبی، افزایش می‌دهد. بمنظور بررسی انباشت کادمیم، مس و آهن توسط گیاه جو بعنوان گیاهی مهم در مناطق خشک، آزمایشی بصورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه سطح کم‌آبی شامل آبیاری در ۱۰۰ (شاهد)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و چهار مرحله نمونه‌گیری (هر ۱۵ روز) در سه تکرار در سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸ در شهرستان جیرفت اجرا شد. بعد از برداشت جو، کاهش غلظت کادمیم، مس و آهن خاک بترتیب ۵۲، ۶۳ و ۲۳ درصد بود. غلظت آنها در شاخساره گیاه بترتیب ۶۶، ۸۵ و ۹۶ درصد نسبت به ریشه کمتر بود. با افزایش کم‌آبی، غلظت آهن باقی‌مانده در خاک و شاخساره افزایش و در ریشه کاهش یافت و غلظت مس در خاک کاهش و در ریشه و شاخساره افزایش یافت درحالی‌که غلظت کادمیم در آنها کاهش یافت. شاخص انباشت شاخساره و شاخص انتقال زیستی سه فلز کمتر از یک بودند در حالی که شاخص انباشت ریشه مس بالاتر از یک بود و با افزایش سطح کم‌آبی با تفاوت معنی‌دار به ۶/۸۲ برابر شاهد رسید. در مدل رگرسیونی چندمتغیره سرعت رشد در دوره‌های رشدی، بیشترین سهم در تبیین واریانس شاخص‌ها متعلق به سرعت‌های رشد در سومین و چهارمین دوره پانزده روزه رشد بود. طبق مدل رگرسیونی بین سرعت رشد و شاخص‌های مورد مطالعه، با افزایش سرعت رشد، شاخص انباشت مس ریشه‌ها به صورت خطی کاهش ($\beta = -0.97$) و شاخص انتقال زیستی برای کادمیم ($\beta = 0.83$) و مس ($\beta = 0.86$) افزایش و برای آهن ($\beta = -0.94$) کاهش یافت. نتیجه‌گیری کلی اینکه تحت تنش خشکی هیچکدام از فلزات مورد مطالعه در شاخساره انباشته نشدند هرچند غلظت مس در ریشه‌ها ۳/۳۱ برابر نسبت به خاک افزایش یافت اما این افزایش منجر به ریسک سمیت‌زایی در شاخساره نشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۳/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۳/۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۵/۱

واژه‌های کلیدی:

آلودگی خاک،
سمیت‌زایی،
شاخص انتقال،
فلزات سنگین،
کم‌آبی.

استناد: مداحی‌نسب، محسن؛ موسوی نیکف سیدمحسن؛ قنبری، سیداحمد؛ سیروس مهر، علیرضا؛ کوهستانی، شاپور (۱۴۰۱). بررسی اثر تنش خشکی بر زیست‌فراهمی و قابلیت انباشت زیستی کادمیم، مس و آهن در جو، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۵)، ۱۱۲۵-۱۱۱۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340204.669226>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تجمع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی یک مشکل بزرگ زیست‌محیطی است. رسوب اتمسفری فلزات معلق حاصل از فعالیت‌های معدنی، ذوب، آفت‌کش‌ها و سنگ‌های مادری منشا بسیاری از آلودگی‌ها هستند (Saravanan *et al.*, 2020). در کشاورزی فشرده، کاربرد انبوه لجن فاضلاب با فضولات دام و طیور موجب افزایش کربن آلی و عناصر ماکرو و میکرو خاک و زمین‌های کشاورزی می‌شود (Marjovvi & Mashayekhi, 2020). وجود فلزات سنگین ضروری و غیرضروری در این مواد، کودهای شیمیایی و آفت‌کشها علاوه بر کاهش میزان تولید و کیفیت محصول گیاه، خاک و آب را آلوده کرده و از طریق انباشت در گیاهان زراعی و غیرزراعی و علوفه دام‌ها، در نهایت با اثر تجمیعی وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند و ریسک سلامت ایجاد می‌کنند (Hou *et al.*, 2020). با توجه به تغییر اقلیم و کاهش بارندگی و مدل‌های کاهش رطوبت خاک‌ها در آینده، افزایش تنش کم‌آبی در مناطق فوق‌محمول است. تنش خشکی اثرات نامطلوب زیادی مانند مهار فتوسنتز و رشد، کاهش جذب مواد مغذی، توقف طول سلولی و تأثیر بر عملکرد آنزیم‌ها و متابولیسم هورمون‌ها در گیاهان دارد. تنش کم‌آبی ضمن کاهش زیست‌فراهمی بعضی عناصر در خاک، با افزایش اسمولیت‌ها، ضمن تنظیم اسمزی احتمالاً تعادل غلظت بعضی کاتیون‌ها در گیاه را تغییر می‌دهد (Khazaei *et al.*, 2016; Ozturk *et al.*, 2021). کادمیم، مس و آهن هر سه از فلزات سنگین هستند اما کادمیم عنصری غیرضروری برای گیاه، با نیمه عمر طولانی و بسیار سمی است که در سراسر جهان باعث اثرات مخرب و مشکلات جدی در کشاورزی می‌شود (Shanmugaraj *et al.*, 2019). جذب کادمیم توسط گیاه نامنظم و بدون محدودیت‌های فیزیولوژیکی است (Engwa *et al.*, 2019) و از دو مسیر آپوپلاستیک و سیمپلاستیک جذب ریشه‌ها و از طریق بارگذاری آوند چوبی، حامل‌های دوربرد و توزیع مجدد آندهای آبکش به شاخساره گیاه منتقل می‌شود لذا در غلظت‌های پایین در خاک جذب شده و باعث کاهش رشد و نمو و فعالیت‌های متابولیکی گیاه و القای آسیب اکسیداتیو در گونه‌های مختلف می‌شود. (Luo & Zhang, 2021). مس و آهن دو عنصر ضروری برای گیاهان هستند اما غلظت بالای مس در گیاه باعث ایجاد استرس اکسیداتیو و گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) می‌شود و در صورت انباشت مسمومیت‌زایی دارد. آهن علی‌رغم سمی نبودن و مفید بودن در ساخت بعضی مولکول‌های بیولوژیکی و فعالیت‌های فیزیولوژیکی، در غلظت‌های بالا می‌تواند با تولید رادیکال‌های آزاد و اکسیداسیون DNA منجر به آسیب آن و آغاز روند بیماری سرطان شود (Engwa *et al.*, 2019). این مشخصات فلزات مورد مطالعه، به ما امکان داد تا انتقال این سه فلز به ریشه و شاخساره جو و وقوع مکانیسم‌های محدودکننده به عنوان تابعی از خاک و فیزیولوژی انتقال گیاه را برای سطوح مختلف کم‌آبی بررسی کنیم.

غلظت کل فلزات در خاک یک شاخص مفید برای میزان آلودگی خاک است، اما خطر زیست‌محیطی ناشی از تجمع فلزات در گیاهان به فراهمی زیستی عناصر بستگی دارد (Liu *et al.*, 2019). زیست‌فراهمی، انباشت و انتقال فلزات سنگین از طریق ریشه گیاهان به وسیله عواملی مانند (۱) عوامل بیولوژیکی مؤثر بر فراهمی زیستی در خاک، (۲) تغییر ویژگی‌های خاک (PH خاک، فعالیت آنزیم‌های خاک، جامعه میکروبی خاک) و تغییر کسر زیستی فلزات سنگین در خاک، (۳) رسوب همزمان سیلیسیم با فلزات سنگین، (۴) تبدیل فلزات سنگین به اشکال کمتر محلول در خاک، (۵) تغییر معماری ریشه برای کاهش جذب فلزات سنگین، (۶) نقش پلاک Fe/Mn ریشه در جداسازی فلزات سنگین، (۷) تنظیم بالا و پایین بیان ژن مسئول جذب، تجمع و انتقال فلزات سنگین به گیاهان، تغییر می‌کند (Khan *et al.*, 2021). غلظت فلزات سنگین در ریشه‌ها، شاخصی از فراهمی زیستی است و ریشه و برگ به ترتیب قسمت‌های اصلی توزیع فلزات سنگین در گیاه هستند (Peng *et al.*, 2021). همچنین از آنجا که جذب فلزات سنگین به مراحل رشد گیاه بستگی دارد (Dinu *et al.*, 2020) بررسی روابط رگرسیونی بین سرعت رشد در مراحل مختلف رشدی با شاخص‌های انباشت و انتقال زیستی فلزات در ریشه و شاخساره گیاه حائز اهمیت است. گیاهان اجتناب‌کننده با مکانیسم‌های فیزیولوژیک از انتقال این فلزات از ریشه به بخش‌های هوایی و تجمع در آنجا جلوگیری می‌کنند (Cecchi *et al.*, 2020) و با جذب و انباشت فلزات در ریشه‌ها، آنها را در خاک، رسوبات و لجن‌ها محصور و غیرمتحرک می‌کنند. این فرایند تثبیت گیاهی^۱ نام دارد که روش امیدبخشی برای بهره‌برداری زراعی از زمین‌های آلوده می‌باشد و مانع انتشار فلزات سمی به زنجیره غذایی می‌شوند و از این طریق امکان کشت در زمین‌های آلوده را گسترش می‌دهند (Lambers & Oliveira, 2019; Saravanan *et al.*, 2020).

مطالعات انباشت فلزات سنگین در گیاهان عمدتاً در شرایط آزمایشگاه و گلخانه انجام شده‌اند و بیشتر روی تأثیر سطوح غلظت فلزات (Hou *et al.*, 2020; Saravanan *et al.*, 2020)، اثر pH یا اثر ریزوموجودات در محیط ریشه متمرکز بوده‌اند (Chetri, 2020; Eid

راهبردهای اکولوژیکی مختلف بین گیاهان و ریزموجودات و محیط اطراف تاثیر می‌پذیرد، انباشت فلزات در ریزوسفر به آهستگی پیش می‌رود و پویاست (Lopez et al., 2022) در حالی که در روش‌های آزمایشگاهی محلول نمک فلزی یکجا به خاک اضافه می‌شود و خاک گلدان‌ها با محیط پویای اطراف ارتباط ندارد. با این وجود برای بررسی انباشت بعضی فلزات سنگین در شرایط کم آبی در گیاه جو تاکنون بعضی آزمایشات گلدانی (Jerbi et al., 2022) انجام شده است اما نتایج تحقیقات مزرعه‌ای در خاک‌های مناطق گرم و خشک در شرایطی که آلودگی به آرامی در حال گسترش است، در دسترس نیست. بنابراین در این پژوهش، گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) که از دیرباز در زنجیره غذایی انسانی و دامی این مناطق حضور دارد، با هدف ارزیابی تأثیر تنش خشکی بر میزان برداشت فلزات کادمیم، مس و آهن خاک توسط آن در شرایط مزرعه مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

برای بررسی تاثیر کم آبی بر انباشت کادمیم، مس و آهن خاک در جو، آزمایشی در جنوب استان کرمان (شهرستان جیرفت) در مزرعه‌ای با مختصات ۲۸ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی و ۵۷ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی با اقلیم گرم و خشک که در ده سال اخیر برای تولید جالیز با ترکیبات کودهای شیمیایی، آلی و لجن فاضلاب غنی شده بود، پیاده‌سازی شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش تا عمق ۰-۳۰/۳ متر

| پارامترها | بافت خاک | کربن آلی (%) | اسیدیته | هدایت الکتریکی ($ds\ m^{-1}$) | نیترژن کل (%) | کادمیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | مس کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | آهن کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) |
|-----------|----------|--------------|---------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| میانگین | لومی شنی | ۰/۶۹ | ۸/۱ | ۳/۵ | ۰/۰۶ | ۳ | ۱۴۹ | ۳۹۴۶۲ |

آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح آبیاری، شامل آبیاری در ظرفیت زراعی (شاهد) و آبیاری در ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی با روش وزن‌سنجی (Sattar et al., 2020) بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی در طول سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ با (سه تکرار) اجرا شد. همچنین در چهار نوبت (t₁₋₄) با فواصل ۱۵ روزه وزن خشک اندامها (w₁₋₄) بر حسب گرم بر مترمربع اندازه‌گیری و سرعت رشد از رابطه $CGR = (w_2 - w_1) / (t_2 - t_1)$ (Sattar et al., 2020) برای هر یک از بازه‌های ۱۵ روزه و کل دوره رشد (۶۰ روز) بر حسب گرم بر مترمربع بر روز محاسبه و تجزیه مرکب برای اندازه‌گیری در زمان بصورت طرح اسپلالت پلات انجام شد.

برای یکنواختی پوشش گیاهی در کرت‌ها، ابتدا بذور جو رقم (جنوب) در جعبه‌های نشایی که از خاک مزرعه پر شده بودند، کشت شدند و نشاء آنها در ده‌روزگی در تراکم مطلوب جو یعنی ۳۰۰ بوته در مترمربع (Hauggaard-Nielsen et al., 2006) در کرت‌ها کشت شدند. به منظور از بین بردن اثرات حاشیه‌ای و کاهش خطا، فاصله بین کرت‌های مجاور از یکدیگر ۰/۷۵ متر و فاصله بین بلوک‌ها از یکدیگر ۲ متر در نظر گرفته شد و آبیاری‌ها با لوله و نمونه‌برداری پس از حذف ۲ خط حاشیه و نیم متر از ابتدا و انتهای هر کرت انجام شد. نمونه‌برداری تصادفی خاک هر کرت تا عمق ۳۰ سانتی‌متری، در زمان انتقال نشاء و زمان برداشت انجام و نمونه‌ها بعد از ۴۸ ساعت خشک و غربال (۲ میلی‌متر) شدند. نمونه‌های شاخساره (ساقه و برگ و خوشه‌های نارس) گیاه از سطح زمین به بالا برداشته شد و نمونه‌برداری از ریشه با برداشتن یک تکه مکعبی ۰،۰۲۸ متر مکعب (۳۰،۵ سانتی متر ارتفاع، عرض و طول) که مرکز مکعب دقیقاً در محل ساقه گیاه تنظیم شده بود، انجام شد (Christensen et al., 2021). نمونه‌های گیاهی بلافاصله با آب مقطر شست‌وشو و در آون با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و پس از آسیاب با تجهیزات عاری از فلز، توزین و آماده آنالیز شدند. استخراج محلول فلزات از نمونه‌های یک گرمی خاک و گیاه، با هضم آنها در ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط سه اسید HNO₃، H₂SO₄ و HClO₄ (با نسبت حجمی ۵:۱:۱) بوسیله مایکروویو دایجسشن (کمپانی آوروورا مدل ترانسفورم ۶۰۰، ساخت کانادا^۱)، با رعایت استانداردهای EPA 3052^۲ انجام و پس از شفاف شدن سوسپانسیون همگن و فیلتراسیون آن، نمونه‌ها با آب دوبار یونزدایی شده، به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده و با دستگاه طیف سنج

۱. (Aurora, Model: Transform 600, Made in Canada).

۲. دستگاه مایکروویو دایجسشن معمولاً برای هضم هر نمونه، دارای برنامه‌ی پیش فرض با در نظر گرفتن استاندارد مربوط به آن می‌باشد و از روش EPA 3052 برای هضم نمونه‌های خاک، لجن، مواد بیولوژیکی و گیاهی استفاده می‌شود.

جذب اتمی (کمپانی آرورا مدل تراس ۱۸۰۰، ساخت کانادا^۱) با روش شعله آنالیز شدند (Filip *et al.*, 2022; Sleimi *et al.*, 2022) و غلظت کل کادمیم، مس و آهن برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت شد. برای تضمین دقت نتایج از محلول‌های کادمیم، مس و آهن استاندارد در کنار نمونه‌های خالی برای کالیبره کردن دستگاه‌ها بر اساس راهنمای کارخانه، استفاده شد.

ضرایب انباشت و انتقال زیستی شامل شاخص انباشت ریشه^۲ ($\frac{C_3}{C_2}$)، شاخص انباشت شاخساره^۳ ($\frac{C_1}{C_2}$) و شاخص انتقال^۴ ($\frac{C_1}{C_3}$) هستند که C_1 میانگین غلظت فلز در شاخساره و C_2 میانگین غلظت فلز در خاک ریزوسفر و C_3 میانگین غلظت فلز در بافت ریشه است. گیاهانی که برای یک فلز شاخص انباشت ریشه بالاتر از یک و شاخص انتقال پایینتر از یک دارند تثبیت‌کننده گیاهی هستند و گیاهانی که برای یک فلز شاخص انباشت شاخساره و شاخص انتقال بزرگتر از یک و شاخص انباشت ریشه کوچکتر از یک دارند، آن را به زنجیره غذایی انتقال می‌دهند (Ansari *et al.*, 2019; Eid *et al.*, 2020).

با توجه به فرض تأثیرپذیری سرعت رشد گیاه از خشکی و از سویی تغییرات سرعت رشد در فواصل مختلف از زمان کاشت، در این آزمایش رگرسیون خطی چندگانه بین سرعت رشد در چهار دوره از رشد با ضرایب انباشت و انتقال زیستی با هدف تعیین دوره‌ای از رشد که بیشترین ارتباط را با ضرایب انباشت و انتقال زیستی برقرار می‌کند، برآورد شد. بعلاوه رگرسیون خطی ساده پیرسون بین سرعت رشد در کل دوره رشد با ضرایب انباشت و انتقال زیستی نیز با هدف تعیین ارتباط سرعت رشد با انباشت هر یک از فلزات در ریشه و شاخساره و نحوه توزیع آنها در گیاه برآورد شد. تجزیه در طول سال‌ها بصورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی و تجزیه مرکب انجام گرفت و اثر متقابل کم آبی و دوره رشد بر سرعت رشد نیز در چهار دوره ۱۵ روزه مقایسه شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (۵٪) و با نرم افزار SPSS (نسخه ۲۴) و تحلیل آماری نمودارهای مقایسه میانگین با نرم‌افزار EXCEL (نسخه ۲۰۱۹) انجام شد.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی برای غلظت فلزات مورد مطالعه در خاک و اندام‌های گیاه، بعد از برداشت جو (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

| آماره‌های توصیفی | غلظت در خاک | | | غلظت در ریشه | | | غلظت در شاخساره | | |
|------------------|-------------|-------|--------|--------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|
| | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن |
| میانگین | ۱/۴۴۷ | ۵۵/۵۳ | ۳۰۱۹۹ | ۰/۳۲۴ | ۹۱/۷۷ | ۷۵۵۸/۹ | ۰/۱۱ | ۱۳/۲۵ | ۲۶۵/۰۳ |
| میانه | ۱/۴۵ | ۵۲/۱۳ | ۲۹۸۶۵ | ۰/۳۱ | ۸۴/۷ | ۸۰۲۷ | ۰/۰۹ | ۱۲/۸۴ | ۲۳۴/۹۶ |
| انحراف استاندارد | ۰/۴۶۱ | ۸/۰۳ | ۴۴۱۴/۴ | ۰/۱۴ | ۵۵/۶ | ۳۱۶۵/۹ | ۰/۰۶۴ | ۳/۹۳ | ۱۳۷/۷۴ |
| حداقل | ۰/۷۹ | ۴۳/۷۲ | ۲۳۸۱۴ | ۰/۱۵ | ۲۸/۹۹ | ۳۲۱۱ | ۰/۰۴ | ۷/۹۸ | ۱۱۰/۸ |
| حداکثر | ۲/۲ | ۷۰/۵۴ | ۳۷۰۱۵ | ۰/۵۲ | ۱۹۱/۳ | ۱۱۵۴۹ | ۰/۲ | ۱۹/۱۲ | ۴۷۶ |

یافته‌ها و بحث

نتایج نشان داد که بعد از برداشت جو، غلظت کادمیم در خاک نسبت به قبل از برداشت با ۵۲ درصد کاهش به ۱/۴۴۷ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مس با ۶۳ درصد کاهش به ۵۵/۵۳ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و آهن با ۲۳ درصد کاهش به ۳۰۱۹۹ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) رسید و غلظت عناصر در شاخساره و ریشه به این ترتیب (کادمیم > مس > آهن) به دست آمد (جدول ۱ و ۲) که با سایر گزارشات مطابقت داشت (Eid *et al.*, 2020). همچنین غلظت هر سه عنصر در ریشه‌ها بیشتر از شاخساره بود به طوری که در شاخساره غلظت آهن ۹۶ درصد، غلظت مس ۸۵ درصد و غلظت کادمیم ۶۶ درصد نسبت به ریشه کمتر بود (جدول ۲). بالاتر بودن غلظت فلزات سنگین در ریشه‌ها قبلاً هم گزارش شده است و تحت تأثیر سازوکاری در ریشه به نام سد ریشه‌ای که انتقال فلزات را به شاخساره محدود می‌کند (Souri *et al.*, 2019).

مکانیزم‌های اجتنابی گیاهان مانند اتصال به دیواره سلول‌ها یا ذخیره در محفظه‌های واکوئلی، آلاینده‌ها را از مکان‌های مهم سلول دور می‌کنند و تصور می‌شود ظرفیت بالایی برای اتصال فلزات سنگین در ریشه وجود دارد (Eid *et al.*, 2020; Pal & Kundu, 2016). حداقل غلظت بحرانی برای کادمیم (۱۶-۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و برای مس (۲۵-۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، در بافتهای هوایی فعال جو، در مرحله پنج برگی و با استفاده از آزمایشات استاندارد در گلخانه مشخص شده است (Davis *et al.*, 1978; Macnicol & Beckett, 1985). در این آزمایش غلظت مس در شاخساره (۱۳/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و غلظت کادمیم در شاخساره ۰/۱۱ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود.

1 . (Aurora, Model: Trace 1800, Made in Canada).

2 . Root bioaccumulation factor (RBAF)

3 . Shoot bioaccumulation factor (SBAF)

4 . Translocation factor (TF)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر سال آزمایش بر روی غلظت کادمیم و آهن در خاک ($P < 0/05$) و غلظت مس در اندامهای هوایی جو ($P < 0/01$) معنی دار بود و تأثیر خشکی بر سرعت رشد، وزن خشک شاخساره و ریشه، غلظت سه فلز در خاک، شاخساره و ریشه گیاه، شاخص انباشت، شاخص تغلیظ و شاخص انتقال هر سه فلز معنی دار بود ($P < 0/01$) ولی اثر متقابل بین سال و سطوح کم آبی تنها روی غلظت مس ریشه ($P < 0/05$) و شاخص انتقال مس ($P < 0/01$) معنی دار بود (جدول ۳ و ۴). قبل از اینکه به بحث مقایسه میانگین نتایج پردازیم، طبق تجزیه واریانس در طول سالها، تغییرات معنی دار متوسط غلظت فلزات در خاک در سال دوم نسبت به سال اول، برای آهن و کادمیم خاک بترتیب کاهش ۲/۸۹ و ۷/۳ درصد و برای مس شاخساره افزایش ۱۳/۵۳ درصد بود. با وجود محیط بسیار پویای خاک زراعی در اطراف ریشهها، تغییرات غلظت فلزات کادمیم و آهن از سینتیک واجذب آنها به محلول خاک و تاخیر در انتقال آنها به ریزوسفر تأثیر پذیرفته است. بدین معنی که جایگزینی کادمیم و آهن برداشت شده توسط گیاه، با تاخیر بیشتری در طول سالها نسبت به مس از سطح سایت‌های جذبی به محلول خاک انجام شده است. تاخیر در واجذب کادمیم و نقش هیدرکسیدهای آهن در تاخیر در واجذب بعضی عناصر از جمله مس گزارش شده است (Silva-Yumi et al., 2018). اما کماکان داده‌ها نشان گر عدم تأثیر کاهش این دو فلز بر جذب این آنها در گیاه هستند. اما در مقابل جذب مس در طول سالها بدلیل تثبیت در ریشه‌های گیاهان سال قبل تحت تأثیر قرار گرفته است. افزایش غلظت مس در شاخساره گیاهان در سال دوم می‌تواند متأثر از قابلیت جو در انباشت مس در ریشه‌ها باشد که در سال بعد مقادیر بالاتری از این فلز را در اختیار گیاه قرار داده و توانسته شرایط ریزوسفر را برای جذب بیشتر آن بهبود دهد (رجوع شود به داده‌های مس در جدول ۵). گزارش شده استقرار مجدد گیاهان در مناطقی که انباشت آلاینده‌ها در ریشه گیاه قبلی وجود داشته به دلیل ایجاد سمیت گیاهی ناشی از مواد آلاینده، شرایط فیزیکی خاک، pH نامساعد، اقلیم خشک و فقدان مواد آلی، پراشکال یا صرفاً برای گیاهان مقاوم و غیرخوراکی مقدور است (Lambers & Oliveira, 2019). در واقع تثبیت مس در ریشه‌های جو در سال اول و احتمالاً کلاته شدن آن تحت اثر رژیم‌های رطوبتی باعث شده که در سال دوم علی‌رغم کاهش کلی غلظت مس در خاک (منظور خاک اطراف ریشه‌ها، بدون بقایای ریشه‌هاست)، فراهمی فرم قابل انتقال آن به شاخساره از طریق شرایط ریزوسفر برای گیاهان کشت شده در سال دوم بیشتر باشد.

جدول ۳. آنالیز واریانس اثر سال‌های آزمایش و کم آبی بر سرعت رشد، وزن خشک و غلظت فلزات در خاک و جو بعد از برداشت

| منابع تغییرات | df | سرعت رشد (gm^2d^{-1}) | وزن خشک (gm^{-2}) | | | خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | | شاخساره (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | | ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | |
|------------------|----|------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|--|
| | | | ریشه | شاخساره | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن | |
| سال | ۱ | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۸۶۸/۰۵ ^{ns} | ۳۶۲/۷ ^{ns} | ۰/۰۶* | ۱/۵ ^{ns} | ۰/۰۰۱* | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۱۲/۷** | ۴/۵۱ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۴۲۷/۹ ^{ns} | ۶۷۶۲۸۴ ^{ns} | |
| سال × تکرار | ۴ | ۰/۱۱۹ ^{ns} | ۱۰۵/۷۷ ^{ns} | ۳۶۲/۵۳ ^{ns} | ۰/۰۸* | ۷/۸ ^{ns} | ۰/۰۰۲* | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۰/۹ ^{ns} | ۸۸۵/۱ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۵۲/۳ ^{ns} | ۹۷۷۹۶۳ ^{ns} | |
| کم آبی | ۲ | ۱۸۳/۱** | ۴۴۰۷۶/۱** | ۶۸۳۷۲۳/۹** | ۱/۵** | ۴۷۸/۵** | ۰/۰۳** | ۰/۰۳** | ۱۱۸/۵** | ۱۵۸۰۸۳** | ۰/۱۷۵** | ۲۴۹۷۶** | ۸۱۱۵۸۶** | |
| سال × کم آبی | ۲ | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۵۸/۷۳ ^{ns} | ۳۳۲/۲۳ ^{ns} | ۰/۰۰۶ ^{ns} | ۸/۱ ^{ns} | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۲/۳ ^{ns} | ۲۶۵/۱۶ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۵۸۱* | ۵۱۳۹۳۵ ^{ns} | |
| خطا | ۸ | ۰/۰۸ | ۱۲۷/۱۹ | ۱۵۳/۳۶ | ۰/۰۱ | ۱۱/۳ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۶۲ | ۳۰۶/۶۱ | ۰/۰۰۳ | ۱۰۰/۷ | ۳۰۷۱۴۴ | |
| ضریب تغییرات (%) | | ۳/۴۹ | ۷/۹۷ | ۲/۵۳ | ۶/۹۹ | ۶/۰۶ | ۲/۲ | ۰/۰۰۰ | ۵/۹۸ | ۶/۶۱ | ۰/۰۰۰ | ۱۰/۹۳ | ۷/۳۳ | |

†. ** و * بترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی دار و ns عدم اختلاف معنی دار است.
 ‡. نتایج واریانس غلظت آهن در خاک براساس لگاریتم طبیعی داده‌ها به دست آمده است.

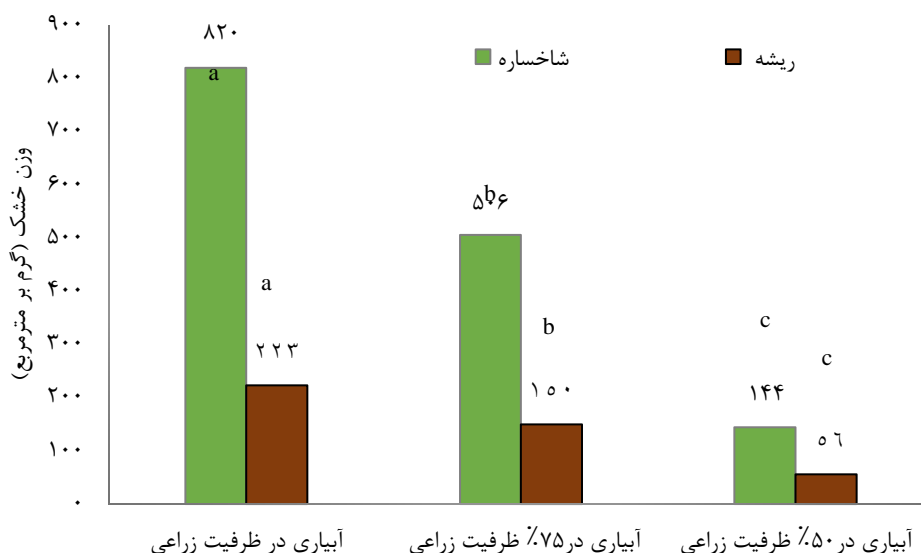
جدول ۴. تجزیه واریانس سال‌های آزمایش و سطوح خشکی بر ضرایب انباشت و انتقال زیستی

| منابع تغییرات | df | شاخص انباشت شاخساره | | | شاخص انباشت ریشه | | | شاخص انتقال | | |
|------------------|----|-------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-----|
| | | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن |
| سال | ۱ | ۲/۵×۵-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۱/۸×۷-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۸ ^{ns} | ۸/۴×۷-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۴ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | |
| سال × تکرار | ۴ | ۷/۲×۵-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۱/۶×۶-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۳** | ۰/۰۵ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | |
| کم آبی | ۲ | ۰/۰۰۳** | ۰/۰۸** | ۹/۱×۵-۱۰** | ۰/۰۱** | ۱۲/۱** | ۰/۱۶۳** | ۰/۰۲۵** | ۰/۰۵۳** | |
| سال × کم آبی | ۲ | ۵/۰۵×۵-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{ns} | ۱/۹×۷-۱۰ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۹ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۴** | |
| خطا | ۸ | ۲/۵×۵-۱۰ | ۰/۰۰۱ | ۴/۳×۷-۱۰ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰۲ | |
| ضریب تغییرات (%) | | ۸/۱۶ | ۹/۱۳ | ۷/۴۳ | ۶/۱۹ | ۱۴/۴۲ | ۷/۷۷ | ۱۰/۳ | ۱۱/۴ | |

†. ** و * بترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی دار و ns عدم اختلاف معنی دار است.

وزن خشک شاخساره و ریشه

وزن خشک شاخساره و ریشه با کم‌آبی، کاهش معنی‌دار داشتند و کاهش وزن خشک شاخساره در سطوح آبیاری در ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۶ و ۱۰ درصد بیش از ریشه‌ها بود. (شکل ۱). گیاهان مختلف در واکنش به تنش خشکی دچار کاهش وزن خشک ریشه و شاخساره می‌شوند (Alikhani *et al.*, 2017; Boudiar *et al.*, 2020; Cai *et al.*, 2020) گیاه جو نیز به عنوان یک گرامینه در صورت مواجهه با تنش رطوبتی در اندام‌های مختلفش کاهش وزن خشک خواهد داشت اما این کاهش در شاخساره نسبت به ریشه شدیدتر است.



شکل ۱. تاثیر خشکی بر وزن خشک شاخساره و ریشه جو

سرعت رشد

در بین چهار دوره پانزده روزه، از نظر سرعت رشد تفاوت معنی‌دار وجود داشت و بیشترین سرعت رشد در پانزده روز چهارم (۱۲/۹ گرم بر مترمربع بر روز) و کمترین آن در پانزده روز اول (۱ گرم بر مترمربع بر روز) به دست آمد. بطور معمول سرعت رشد گرامینه‌های یکساله تا مرحله گلدهی در حال افزایش است و بعد از آن با شروع پر شدن دانه سرعت رشد کاهش می‌یابد تا در مرحله رسیدگی دانه به حداقل خود برسد. در این آزمایش نیز سرعت رشد با طولانی‌تر شدن دوره رشد تا ۶۰ روزگی که شاخساره برداشت شد، در حال افزایش بود. کم بودن سرعت رشد جو در مراحل اولیه رشد به دلیل عدم پوشش گیاهی و کم بودن دریافت نور خورشید توسط گیاه دانسته شده است که با گذشت تعداد روزهای بیشتر از زمان کاشت با افزایش شاخص سطح برگ و دریافت PAR بیشتر منجر به جذب فتوسنتزی بالاتر و در نهایت رشد سریعتر می‌شود (Abbasi Surki *et al.*, 2020).

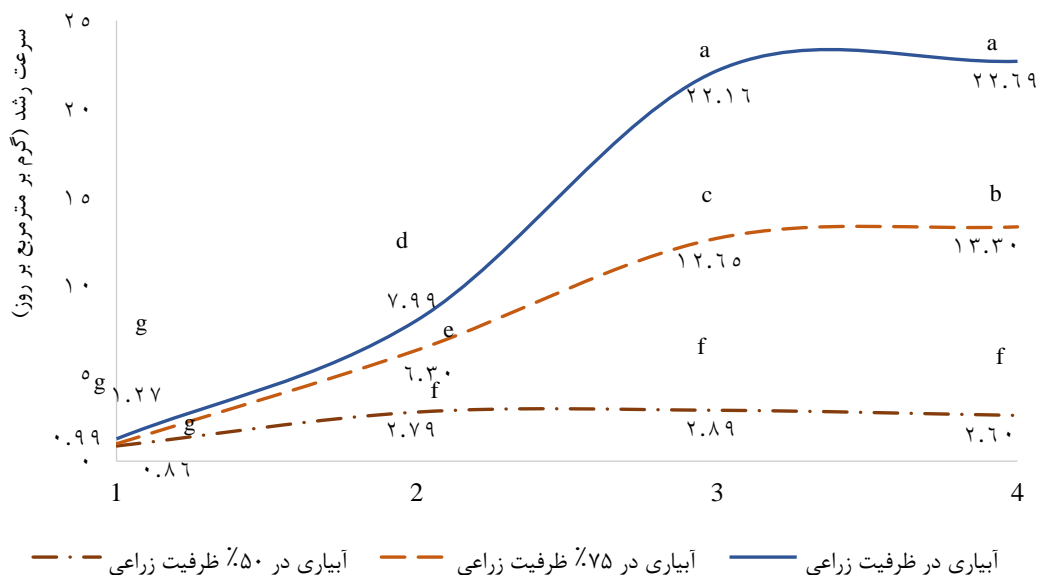
کم‌آبی نیز سرعت رشد را کاهش معنی‌دار داد و بیشترین سرعت رشد در تیمار شاهد (۱۳/۵۳ گرم بر مترمربع بر روز) و کمترین آن در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۲/۲۸ گرم بر مترمربع بر روز) به دست آمد (جدول ۵). کاهش سرعت رشد تحت تاثیر کم‌آبی امری پذیرفته شده است چرا که محدودیت‌های آبی بر روابط آب برگ، فلورسانس کلروفیل و فرآیندهای فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد و منجر به محدود شدن سرعت رشد گیاه و پیری زودرس می‌شود (Sallam *et al.*, 2019).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر سطوح کم‌آبی بر سرعت رشد و غلظت فلز در ریشه، شاخساره و خاک بعد از برداشت جو

| خشکی | سرعت رشد (گرم بر مترمربع بر روز) | خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | | شاخساره (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | | ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | | |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------------|-----|------|----------------------------|-------|--------|
| | | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن | کادمیم | مس | آهن |
| آبیاری در ۵۰٪ ظرفیت زراعی | ۲/۲۸c | ۰/۹۲c | ۴۸/۴۶c | ۳۵۴۸۷a | ۰/۰۴c | ۱۸a | ۴۴۰a | ۰/۱۶c | ۱۶۰a | ۳۸۰۴c |
| آبیاری در ۷۵٪ ظرفیت زراعی | ۸/۳۱b | ۱/۴۷b | ۵۲/۵۸b | ۲۹۴۲۳b | ۰/۰۹b | ۱۳b | ۲۳۶b | ۰/۳۱b | ۸۴b | ۷۷۱۸b |
| آبیاری در ظرفیت زراعی | ۱۳/۵۳a | ۱/۹۵a | ۶۵/۵۷a | ۲۵۶۸۸c | ۰/۱۹a | ۹c | ۱۱۹c | ۰/۵a | ۳۱/۷c | ۱۱۱۵۵a |

در هر ستون داده‌هایی که با حروف انگلیسی متفاوت از هم مشخص شده‌اند، با هم اختلاف معنی‌دار دارند.

بررسی اثر متقابل کم‌آبی و دوره رشد بر سرعت رشد نشان داد که سرعت رشد در ۱۵ روز اول در بین تیمارهای آبیاری فاقد تفاوت معنی‌دار بود اما در دوره‌های ۱۵ روزه بعدی تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۲). از این نتیجه می‌توان اینگونه استنباط کرد که در ۱۵ روز اول که مصادف با شروع تیمارهای کم‌آبی بوده، هنوز رطوبت خاک کرت‌ها به هم نزدیک بوده ولی با گذشت زمان کرت‌هایی که تیمار کم‌آبی داشتند سطح رطوبت‌شان پایین آمد و تفاوت معنی‌دار در سرعت رشد تیمارهای آبیاری آشکار شد. بعلاوه گذشت زمان اثرات زوال و پیری را زودتر در تیمارهای کم‌آب نشان می‌دهد و سرعت رشد در تیمارهای کم‌آب زودتر کاهش می‌یابد (Sallam *et al.*, 2019). تیمار آبیاری در ظرفیت زراعی، در همه ادوار حائز بیشترین سرعت‌های رشد بود. در تیمارهای آبیاری در ظرفیت زراعی و آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، بالاترین سرعت رشد در دوره ۱۵ روزه چهارم به دست آمد (به ترتیب ۲۲/۶۹ و ۱۳/۳ گرم بر مترمربع بر روز) اما در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بالاترین سرعت رشد در ۱۵ روزه دوم (۲/۷۹ گرم بر مترمربع بر روز) حاصل شد و با دوره‌های ۱۵ روزه سوم و چهارم تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل ۲). همانطور که اشاره شد با بالاتر رفتن سطوح کم‌آبی فرایند زوال فیزیولوژیک که با کاهش اسیمیلاسیون نوری در گیاه همراه است، تسریع می‌شود (Sallam *et al.*, 2019) بنابراین دوره اوج و نزول سرعت رشد در تیمارهای کم‌آب‌تر علاوه بر اینکه زودتر اتفاق می‌افتد، در در سطوح پتینتری از سرعت رشد اتفاق می‌افتد. بعلاوه با گذشت زمان، توسعه سطح برگ و دریافت نور و تولید ماده خشک توسط تیمارهایی که تنش کمتری دریافت می‌کنند بیشتر است (Abbasi Surki *et al.*, 2020). به همین دلیل است که در تمام ادوار رشد، بالاترین سرعت رشد‌ها در تیمار آبیاری در ظرفیت زراعی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. اثر متقابل بین کم‌آبی و دوره رشد بر سرعت رشد در چهار دوره ۱۵ روزه (روی محور افقی ۱=۱۵، ۲=۳۰، ۳=۴۵ و ۴=۶۰ روزه‌گی)

غلظت فلزات در خاک و گیاه جو بعد از برداشت

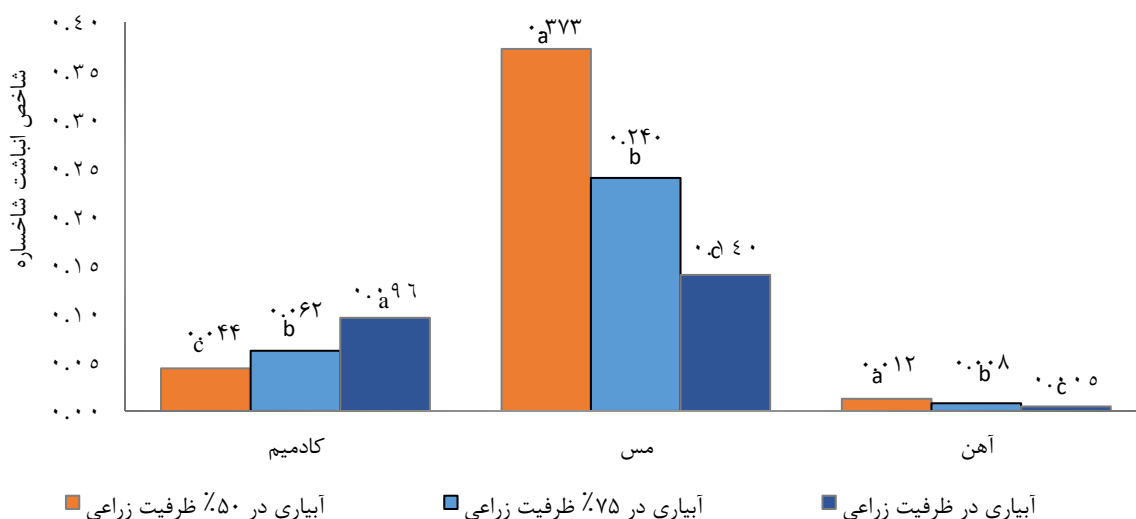
با افزایش سطح کم‌آبی، غلظت آهن باقی‌مانده در خاک افزایش یافت درحالی‌که غلظت مس و کادمیم خاک کاهش یافت. در بافت‌های گیاه، با افزایش سطح کم‌آبی، غلظت کادمیم در ریشه و شاخساره کاهش یافت اما غلظت مس در هر دو بخش افزایش یافت (جدول ۵). به نظر می‌رسد که کاهش همزمان کادمیم خاک و کادمیم جذب شده در شرایط کم‌آبی، از سینتیک واجذب کادمیم در شرایط کم‌آبی متأثر شده باشد. یعنی در شرایط کم‌آبی مدت زمان واجذب کادمیم از سایت‌های تبدالی در ترکیب خاک این مزرعه به محلول خاک بیش از مس و آهن است. در این شرایط احتمالاً وظیفه واجذب به سایت‌های موجود در عمق که رطوبت بیشتری دارند محول خواهد شد اما به دلیل کم‌آبی، انتقال کادمیم واجذب شده به محدوده ریزوسفر با تاخیر بیشتری اتفاق می‌افتد. تغییرات ریزوسفر و عوامل موثر در کاهش انحلال و تحرک کادمیم در شرایط کم‌آبی از دلایل تاخیر در تامین مجدد کادمیم معرفی شده‌اند (Alloway, 2013) و می‌توانند از عوامل تفاوت سینتیک واجذب کادمیم نسبت به آهن و مس باشند. اما باید به این نکته توجه داشت که باوجود گزارشاتی از افزایش زمان واجذب کادمیم در شرایط کم‌آبی، این وضعیت ممکن است از اشکال مختلفی از جایگزینی کاتیونها در محلول خاک مزرعه نیز تاثیر پذیرفته باشد. از سوی دیگر پیش بینی "قدرت جایگزینی" کاتیونها نیز آسان نیست زیرا به چندین ویژگی سیستم از جمله ماهیت جاذب، غلظت فلز در محلول،

نوع جذب یون در لایه اول سطح مبادله، دما و pH بستگی دارد. همین عوامل روی سینتیک واجذب عناصر نیز تاثیر دارند، مثلا گزارش شده که ظرفیت جذب کادمیم در غلظت‌های کم آلاینده بر روی جاذب‌های آلفان طبیعی با پوشش اکسید آهن به سرعت افزایش می‌یابد و ایزوترم برای Cd^{+2} مطابق با نوع L است که تمایل به رسیدن به حداکثر ظرفیت جذب دارد. در مقابل، ایزوترم Cu^{+2} شبیه نوع H است که نشان می‌دهد جاذب تمایل بیشتری به مس نسبت به کادمیم دارد (Silva-Yumi et al., 2018).

غلظت آهن با افزایش سطح کم‌آبی در ریشه و شاخساره رفتار متضادی نشان داد. به این شکل که در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در شاخساره افزایش (۴۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در ریشه کاهش (۳۸۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) یافت (جدول ۵). هرچند گزارش کاهش غلظت آهن در شاخساره تحت تاثیر کم‌آبی برای گیاهانی مثل عدس وجود دارد (Alikhani et al., 2017) ولی غلظت باقی‌مانده آهن و مس در خاک، شاخساره و ریشه گیاه با توجه به کاهش رشد گیاه در نتیجه کم‌آبی و در نتیجه تغییر ظرفیت جذب عناصر قابل توجه است. افزایش باقیمانده آهن در خاک بدلیل کاهش برداشت آن توسط ریشه اتفاق افتاد اما افزایش غلظت آن در شاخساره بدلیل اختصاص سهم بیشتری از آهن جذب شده به شاخساره بود که در بخش روابط رگرسیونی بین سرعت رشد و شاخص انتقال زیستی آهن در جو بررسی خواهیم کرد.

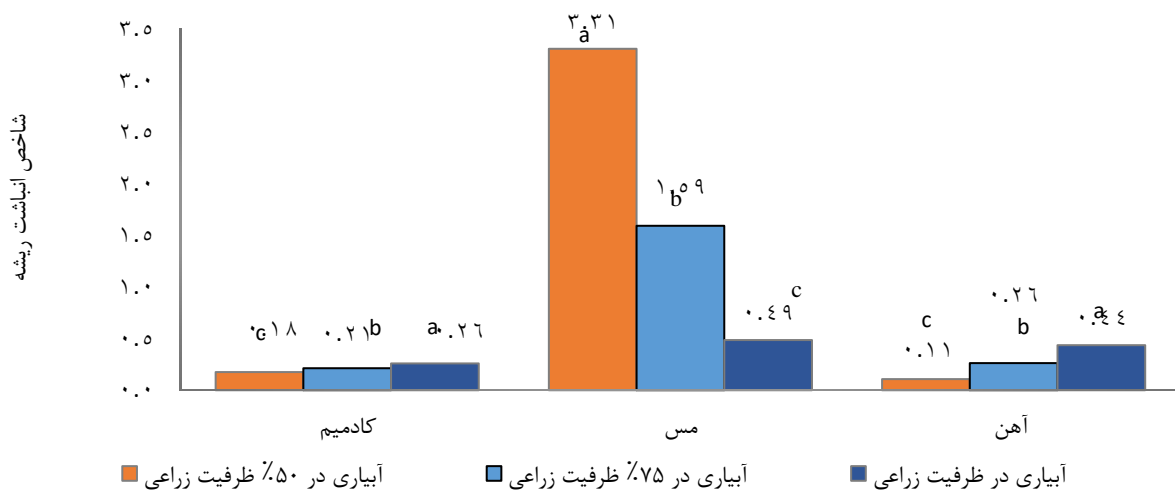
ضرایب انباشت و انتقال زیستی

تحت تاثیر کم‌آبی، بالاترین مقادیر شاخص انباشت شاخساره برای مس و کمترین مقادیر آن برای آهن به دست آمد (شکل ۳). برای کادمیم بیشترین مقدار شاخص انباشت شاخساره در تیمار شاهد (۰/۰۹۶) و کمترین مقدار در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۰/۰۴۴)، با کاهش معنی‌دار بین سطوح تیمار به دست آمد. شاخص انباشت شاخساره برای مس و آهن در بین سطوح آبیاری افزایش معنی‌دار داشت و از کمترین مقدار در تیمار شاهد با افزایش ۲/۷ برابری برای مس، در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به (۰/۳۷) و برای آهن با افزایش ۲/۴ برابری نسبت به شاهد، در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به (۰/۰۱۲) رسید (شکل ۳).

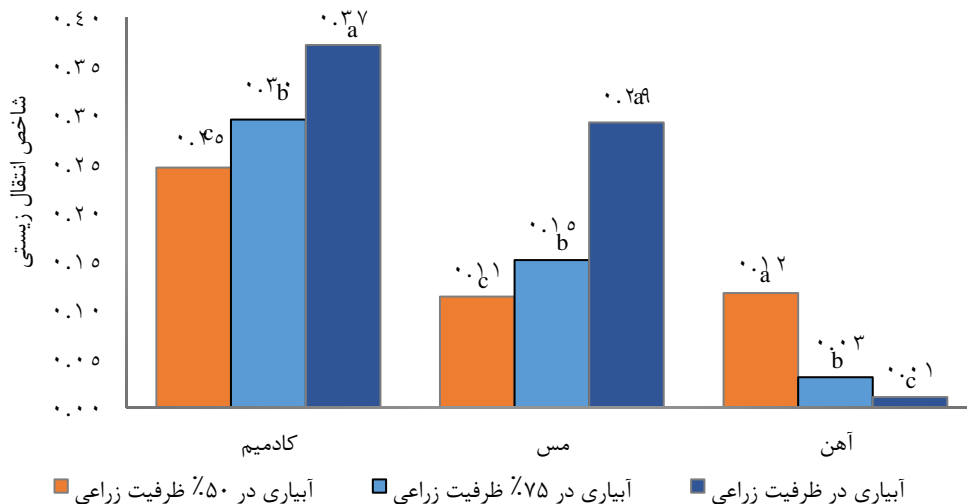


شکل ۳. تاثیر کم‌آبی بر شاخص انباشت شاخساره آهن، مس و کادمیم در جو

با بالا رفتن سطح کم‌آبی، شاخص انباشت ریشه برای کادمیم و آهن با کاهش معنی‌دار در تمام سطوح از تیمار شاهد (به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۴۴) به ترتیب با ۳۲ و ۷۵ درصد کاهش، در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب به (۰/۱۸) و (۰/۱۱) رسید در حالی که در تمام سطوح آبیاری پایین تر از یک بود (شکل ۴). شاخص انباشت ریشه برای مس در تیمار آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی با ۳/۲۸ برابر افزایش نسبت به شاهد به (۱/۵۹) رسید و در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی با بیش از ۱۰۰ درصد افزایش نسبت به تیمار آبیاری در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به (۳/۳۱) رسید و در این سطح از کم‌آبی ۶/۸۲ برابر تیمار شاهد بود (شکل ۴).



شکل ۴. تاثیر خشکی بر شاخص انباشت ریشه آهن، مس و کادمیم در جو



شکل ۵. تاثیر خشکی بر شاخص انتقال زیستی آهن، مس و کادمیم در جو

با بالا رفتن سطح کم‌آبی، شاخص انتقال زیستی برای کادمیم و مس معنی‌دار و کاهش و برای آهن معنی‌دار و افزایشی بود اما در تمام سطوح برای هر سه فلز کمتر از یک بود (شکل ۵). پایین‌تر از یک بودن شاخص انباشت شاخساره و شاخص انتقال زیستی جو برای کادمیم، مس و آهن، آن را گیاهی اجتناب‌کننده نسبت به آنها نشان می‌دهد چرا که بیش‌انباشتگرها^۱ با انتقال موثر فلز از ریشه به شاخساره، شاخص انتقال زیستی و شاخص انباشت شاخساره بزرگتر از یک دارند (Ansari et al., 2019). این خصوصیت جو به دلیل عدم انتقال کادمیم و مس به زنجیره غذایی در شرایط کم‌آبی مفید است چون در شرایط کم‌آبی، ریشه گیاهان بعضی از یون‌های فلزی را برای تعادل اسمزی بیشتر وارد می‌کند (Dubey, 2016). این در حالی است که افزایش شاخص انباشت ریشه برای مس تا اعداد بالاتر از یک، جو را بعنوان تثبیت‌کننده مس در خاک مطرح می‌کند. در شرایط کم‌آبی که کاهش دسترس‌پذیری کاتیون‌ها اتفاق می‌افتد، افزایش معنی‌دار شاخص انباشت ریشه برای مس تایید می‌کنند که در ورود مس به ریشه جو، سازوکارهای فیزیولوژیکی گیاه نقش داشته‌اند. کاهش معنی‌دار شاخص انباشت ریشه برای آهن و کادمیم نیز نشان می‌دهد در ورود آهن و کادمیم به ریشه، کاهش زیست‌فراهمی آنها در شرایط کم‌آبی، نسبت به سازوکارهای فیزیولوژیکی دست بالاتر را داشته است. افزایش معنی‌دار شاخص انباشت شاخساره مس و آهن و کاهش آن برای کادمیم با کم‌آب‌تر شدن خاک مؤید این است که در توزیع هر سه فلز در داخل گیاه، نقش و دخالت عوامل فیزیولوژیکی بارزتر است مثلاً در مورد آهن علی‌رغم کاهش غلظت آن در ریشه و کاهش شاخص انباشت ریشه، بدلیل نیاز فیزیولوژیکی گیاه، غلظت آهن در شاخساره و

شاخص انباشت شاخساره آهن افزایش یافته تا جایی که شاخص انتقال زیستی آن با توسعه خشکی افزایشی شده است اما برای کادمیم اوضاع برعکس پیش‌رفته است. هرچند که در مورد مس افزایش شاخص انباشت شاخساره در شرایط کم‌آبی می‌تواند متأثر از انباشت بیشتر آن در ریشه باشد اما در نهایت شاخص انتقال این فلز با کم‌آبی روند کاهشی داشت و دست بالای سازوکارهای فیزیولوژیک را در توزیع آن در گیاه، نسبت به زیست‌فراهمی نشان داد. *Jerbi et al.* (۲۰۲۲) در یک آزمایش گلخانه‌ای در گلخانه برای مس نتایج مشابه با این آزمایش بدست آوردند اما در مورد آهن کاهش غلظت در شاخساره را گزارش کردند.

اثر متقابل بین سال آزمایش و سطوح کم‌آبی

اثر متقابل بین سال آزمایش و سطوح کم‌آبی در تیمارهای کم‌آبتر موجب افزایش معنی‌دار غلظت مس در ریشه (۱۷۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کاهش شاخص انتقال مس (۰/۱) هر دو در سال دوم و در تیمار آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد (جدول ۶). احتمالاً انباشت مس در ریشه جو در تیمارهای کم‌آب‌تر سال قبل، عامل فراهمی و انباشت بیشتر مس در ریشه گیاه در سال دوم باشد. در استقرار مجدد گیاهان در خاکی که قبلاً در آن گیاهان تثبیت‌کننده کشت شده، این خاصیت مشاهده شده است (Lambers & Oliveira, 2019).

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل بین سال آزمایش و کم‌آبی بر غلظت فلز مس در ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و شاخص انتقال زیستی آن

| سال آزمایش | سال اول | | سال دوم | | کم‌آبی |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| | آبیاری در ۵۰٪ ظرفیت زراعی | آبیاری در ۷۵٪ ظرفیت زراعی | آبیاری در ۵۰٪ ظرفیت زراعی | آبیاری در ۷۵٪ ظرفیت زراعی | |
| غلظت در ریشه | ۱۴۳/۷ b | ۸۴/۷ c | ۳۲/۳ d | ۱۷۶/۲ a | ۳۱/۱ d |
| شاخص انتقال مس | ۰/۱۲ d | ۰/۱۳ cd | ۰/۲۵ b | ۰/۱ d | ۰/۳۳ a |

در هر ردیف داده‌هایی که با حروف انگلیسی متفاوت از هم مشخص شده‌اند، با هم اختلاف معنی‌دار دارند.

روابط بین سرعت رشد و ضرایب غلظت زیستی

رگرسیون خطی چندگانه بین سرعت رشد در ۴ مرحله ۱۵ روزه حاصل از تقسیم دوره رشد گیاه با هریک از ضرایب انباشت و انتقال زیستی نشان داد که سرعت رشد در ۱۵ روز سوم بیشترین سهم را در تبیین شاخص انباشت شاخساره کادمیم، شاخص انباشت ریشه آهن و شاخص انتقال زیستی کادمیم و مس داشته و سرعت رشد ۱۵ روز چهارم بیشترین سهم را در تبیین شاخص انباشت شاخساره مس و آهن، شاخص انباشت ریشه کادمیم و مس و شاخص انتقال زیستی آهن داشته است (جدول ۷).

جدول ۷. ضرایب استاندارد شده (β) در مدل رگرسیونی خطی چند متغیره بین سرعت‌های رشد چهار مرحله رشدی با ضرایب انباشت و انتقال زیستی

| ضرایب انباشت و انتقال زیستی | شاخص انتقال زیستی | | | شاخص انباشت ریشه | | | شاخص انباشت شاخساره | | |
|-----------------------------|-------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
| | آهن | مس | کادمیم | آهن | مس | کادمیم | آهن | مس | کادمیم |
| سرعت رشد ۱۵ روز اول | ۰/۳۳ | ۰/۰۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۸ | ۰/۱۴ | ۰/۴۸ | ۰/۱۹ | ۰/۰۶ | ۰/۱۶ |
| سرعت رشد ۱۵ روز دوم | ۰/۵۵ | ۰/۳۱ | ۰/۳۴ | ۰/۱۹۷ | ۰/۱۹ | ۰/۳۷ | ۰/۰۸ | ۰/۱۶ | ۰/۵۶ |
| سرعت رشد ۱۵ روز سوم | ۰/۷۸ | ۳/۲۶ | ۴/۷۹ | ۲/۴۶۸ | ۰/۰۱ | ۱/۷۹ | ۱/۱۸ | ۰/۲۸ | ۲/۲۹ |
| سرعت رشد ۱۵ روز چهارم | ۱/۴۸ | ۲/۱۴ | ۳/۵۳ | ۱/۱۵۸ | ۰/۹۳ | ۲/۵۵ | ۱/۹۲ | ۱/۳۳ | ۰/۹۶ |
| ضریب تبیین R ² | ۰/۹۳ | ۰/۷۹ | ۰/۷۴ | ۰/۹۸ | ۰/۹۶ | ۰/۷۰ | ۰/۹۶ | ۰/۹۲ | ۰/۹۴ |
| معنی‌داری مدل | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ | P<۰/۰۱ |

در این مطالعه تنها شاخصی که بالاتر از یک به‌دست آمد، شاخص انباشت ریشه مس بود و در بین فلزات مورد آزمایش، مس تنها فلزی بود که با پیشرفت روند خشکی و کاهش سرعت رشد، شاخص انباشت زیستی (ریشه و شاخساره) افزایشی بود. تنش خشکی در گندم نیز باعث تغلیظ بیشتر مس در ریشه و ساقه شده است (Mahmoud et al., 2021). اما ضریب استاندارد (β) برای شاخص انباشت ریشه جو در دوره ۱۵ روزه چهارم رشد آن، از آن جهت قابل توجه است که در این دوره که با بیشترین تغییرات تجمعی ناشی از

کم‌آبی در گیاه همراه است، بیشترین تغلیظ مس در ریشه اتفاق افتاده است. در دوره ۱۵ روزه چهارم، بدلیل شروع مقدمات ظهور سنبله^۱ (Romdhane *et al.*, 2020)، بیشترین حساسیت به کم‌آبی وجود دارد لذا دور از انتظار نیست که بیشترین اثرات کم‌آبی در این زمان بروز و ظهور یابند. این نتیجه با گزارش مارشور (مبنی بر اینکه افزایش غلظت مس موجب کاهش اکسین از طریق تأثیر بر متابولیسم نیتروژن و اسید آمینه تریپتوفان و در نتیجه کاهش طول ریشه‌ها و ساقه می‌شود) سازگار بود (Yusefzaee & pourakbar, 2017).

مدل رگرسیونی سرعت رشد، شاخص انباشت شاخساره کادمیم، مس و آهن را به ترتیب با ضرایب رگرسیونی استاندارد (β) ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۷- و با ۸۸، ۹۱ و ۹۵ درصد از واریانس آنها پیش‌بینی کرد. همچنین این مدل شاخص انباشت ریشه کادمیم، مس و آهن را به ترتیب با ضرایب رگرسیونی استاندارد شده (β) ۰/۷۹، ۰/۹۷- و ۰/۹۷ و با ۶۲، ۹۵ و ۹۴ درصد از واریانس آنها پیش‌بینی کرد ($P < 0/01$). شاخص انتقال زیستی برای کادمیم با افزایش سرعت رشد به صورت خطی افزایش یافت ($R^2 = 0/69$; $\beta = 0/83$), همین‌طور شاخص انتقال زیستی مس ($R^2 = 0/74$; $\beta = 0/86$; $P < 0/01$)، اما شاخص انتقال زیستی آهن با $\beta = -0/94$ و $R^2 = 0/89$ کاهش یافت (جدول ۸).

جدول ۸. مدل رگرسیون خطی بین سرعت رشد (CGR) در طول کل دوره رشد با ضرایب انباشت و انتقال زیستی

| معنی‌داری مدل | ضریب تبیین R^2 | ضریب استاندارد شده (β) | معادله | فلزات مورد مطالعه | ضرایب انباشت و انتقال زیستی |
|---------------|------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| $P < 0/01$ | ۰/۸۹ | -۰/۹۴ | $y = -0.01 \text{ CGR} + 0.13$ | آهن | |
| $P < 0/01$ | ۰/۷۴ | ۰/۸۶ | $y = 0.02 \text{ CGR} + 0.06$ | مس | شاخص انتقال زیستی |
| $P < 0/01$ | ۰/۶۹ | ۰/۸۳ | $y = 0.01 \text{ CGR} + 0.21$ | کادمیم | |
| $P < 0/01$ | ۰/۹۴ | ۰/۹۷ | $y = 0.03 \text{ CGR} + 0.03$ | آهن | |
| $P < 0/01$ | ۰/۹۵ | ۰/۹۷ | $y = -0.26 \text{ CGR} + 3.86$ | مس | شاخص انباشت ریشه |
| $P < 0/01$ | ۰/۶۲ | ۰/۷۹ | $y = 0.0072x + 0.1583$ | کادمیم | |
| $P < 0/01$ | ۰/۹۵ | -۰/۹۷ | $y = -0.0007 \text{ CGR} + 0.0141$ | آهن | |
| $P < 0/01$ | ۰/۹۱ | ۰/۹۶ | $y = -0.02 \text{ CGR} + 0.42$ | مس | شاخص انباشت شاخساره |
| $P < 0/01$ | ۰/۸۸ | ۰/۹۴ | $y = 0.005 \text{ CGR} + 0.030$ | کادمیم | |

مدل رگرسیونی برازش شده برای شاخص انباشت شاخساره کادمیم درصد بالاتری از واریانس را نسبت به شاخص انباشت ریشه آن برازش کرد، بنابراین سرعت رشد با بارگیری کادمیم در شاخساره، ارتباط بیشتری برقرار می‌کند تا جایی که با کاهش سرعت رشد تحت تأثیر کم‌آبی، شاخص انباشت کادمیم در شاخساره کاهشی‌تر از ریشه شد و شاخص انتقال کادمیم نیز کاهشی شد. داده‌های جمع‌آوری شده در مورد کادمیم نشان می‌دهند که گرامینه‌ها معمولاً کادمیم و بسیاری از فلزات سنگین را در اندام هوایی خود تجمع نمی‌دهند (Souri *et al.*, 2019). زیست‌فراهمی کادمیم در محیط‌های آبکشت با خاک مزرعه متفاوت گزارش شده و جذب فعال آن وابسته به غلظت آن در محلول خاک و میزان دسترسی ریشه‌ها به محلول و سرعت جایگزینی کادمیم جذب شده توسط گیاه در محلول است (Alloway, 2013). با کاهش سرعت رشد، شاخص‌های انباشت شاخساره و ریشه مس با ضرایب نزدیک به هم، به صورت خطی افزایش یافتند اما شاخص انتقال آن به دلیل بالاتر از یک بودن شاخص انباشت ریشه کاهشی شد لذا بنظر می‌رسد که جو برای تثبیت مس در خاک در شرایط خشکی مناسب باشد و آنرا به بخش هوایی و زنجیره غذایی منتقل نکند. عوامل موثر بر غلظت مس در ریزوسفر، بیشتر بر غلظت مس در ریشه‌ها موثرند تا غلظت آن در اندام‌های هوایی و کاهش انباشت مس با افزایش سرعت رشد ناشی از تامین رطوبت، بر اساس گزارش کاهش فعالیت مس آزاد در محلول خاک به دلیل افزایش تشکیل کمپلکس با کربن آلی محلول قابل توجه است (Degryse *et al.*, 2008). تفاوت کم بین غلظت مس شاخساره گیاهان سالم و گیاهانی که دچار سمیت مس شده‌اند نشانگر وجود یک عامل تنظیم‌گر همواستاتیک برای ممانعت از انتقال مازاد مس از ریشه به شاخساره است (Alloway, 2013). در مورد آهن که حرکت آن در گیاهان عموماً از طریق

کیلیت با سترات، فیتوسیدروفورها، نیکوتیانامین، موگینییک اسید و به شکل یون های آهن آزاد صورت می گیرد نیز اثربخشی نسبی تغییرات زیست‌فراهمی و همئوستازی سایر فلزات سنگین و برهمکنش‌های ژنی در نحوه تخصیص آهن در شرایط کم‌آبی که فشارهای کمبود آهن در سمت ریشه ایجاد می‌کند، گزارش شده است (Shumayla & Upadhyay, 2022). احتمالاً ورود آهن و مس بیشتر به شاخساره و برگ گیاه با کاهش سرعت رشد جو برای تعدیل اثرات اشباع نوری در تیمارهای کم‌آب بوده است و موجب افزایشی شدن شاخص انباشت زیستی شاخساره آهن و مس و شاخص انتقال زیستی آهن شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت ایمنی غذا، انتقال مقادیر قابل ملاحظه فلزات سنگین به بخش مصرفی گیاه، یک عامل محدود کننده برای استفاده از بسیاری از خاک‌های کشاورزی است. یافته‌های این مطالعه نشان داد هرچند که با افزایش میزان خشکی، استراتژی جو برای آهن افزایش انتقال به شاخساره بود اما هیچکدام از سه فلز مورد بررسی در شاخساره آن بیش‌انباشت و مستعد سمیت نشدند. همچنین مدل رگرسیونی روابط بین سرعت رشد و ضرایب انباشت و انتقال زیستی نشان داد که با کاهش سرعت رشد، همراه با زوال فیزیولوژیک گیاه تحت تاثیر خشکی، انباشت مس در ریشه افزایش می‌یابد و چهارمین دوره ۱۵ روزه رشد جو بیشترین نقش را در این مسیر ایفا می‌کند. بعد از برداشت جو به دلیل به جا ماندن مس انباشته در ریشه‌های آن، استقرار گیاهان حساس به مس مشکل خواهد بود و کشت محصولاتی که در صورت غلظت بالای مس در خاک با انباشت آن در شاخساره آنها به زنجیره غذایی انتقال می‌دهند، توصیه نمی‌شود. اما آزمایش کشت مخلوط این گیاهان با جو در زمین‌های آلوده به مس پیشنهاد می‌شود. زیرا نتایج تحقیق فعلی این فرضیه را به وجود می‌آورد که کشت همزمان گیاهی که مس را به بخش خوراکی منتقل می‌کند با جو، ممکن است باعث شود مس قبل از انباشت در گیاه همراه، در ریشه‌های جو انباشته شود و ریسک انتقال آن به بخش خوراکی گیاه همراه کمتر شود. در این حالت امکان تولید بعضی محصولات در زمین‌های آلوده به مس فراهم می‌شود. پیشنهاد دیگر کشت گیاهان استخراج کننده مس در تناوب با جو است تا از طریق گیاه‌پالایی توسط این گیاهان، مس انباشته شده در ریشه‌های به جا مانده از جو به خارج از زمین منتقل شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbasi Surki, A., Nazari, M., Fallah, S., Iranipour, R., & Mousavi, A. (2020). The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond-cereal agroforestry systems in semi-arid regions. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1111-1122.
- Alikhani, H. A., Abolfazli, B., & Rejali, F. (2017). Effect of water stress and mycorrhizal fungi *Rhizophagus intraradices* and *Funneliformis mosseae* on uptake of some nutrients and growth properties in lentils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(3), 37-53.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (A. Fotovat, Trans.; 3 ed.). Springer.
- Ansari, A. A., Gill, S. S., Gill, R., Lanza, G. R., & Newman, L. (2019). *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 6* (Vol. 6). Springer International Publishing.
- Boudiar, R., Casas, A. M., Gioia, T., Fiorani, F., Nagel, K. A., & Igartua, E. (2020). Effects of Low Water Availability on Root Placement and Shoot Development in Landraces and Modern Barley Cultivars. *Agronomy*, 10(1), 134.
- Cai, K., Chen, X., Han, Z., Wu, X., Zhang, S., Li, Q., Nazir, M. M., Zhang, G., & Zeng, F. (2020). Screening of Worldwide Barley Collection for Drought Tolerance: The Assessment of Various Physiological Measures as the Selection Criteria [Original Research]. *Frontiers in plant science*, 11(1159), English.
- Cecchi, L., Španiel, S., Bianchi, E., Coppi, A., Gonnelli, C., & Selvi, F. (2020). *Odontarrhena stridii* (Brassicaceae), a new Nickel-hyperaccumulating species from mainland Greece. *Plant Systematics and Evolution*, 306(4), 69.
- Chetri, B. K. (2020). Phytoremediation: Role of Mycorrhiza in Plant Responses to Stress. In A. Kumar Upadhyay, R. Singh, & D. P. Singh (Eds.), *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment* (1 ed., pp. 125-143). Springer.
- Christensen, C. T., Zotarelli, L., Haynes, K. G., & Colee, J. (2021). Quantifying *Solanum chacoense* root morphology responses to limited nitrogen supply using in vitro, hydroponic, and field monolith methods. *American Journal of Potato Research*, 98(2), 157-170.
- Davis, R. D., Beckett, P. H. T., & Wollan, E. (1978). Critical levels of twenty potentially toxic elements in



- young spring barley. *Plant and Soil*, 49(2), 395-408.
- Degryse, F., Verma, V., & Smolders, E. (2008). Mobilization of Cu and Zn by root exudates of dicotyledonous plants in resin-buffered solutions and in soil. *Plant and Soil*, 306(1), 69-84.
- Dinu, C., Vasile, G.-G., Buleandra, M., Popa, D. E., Gheorghe, S., & Ungureanu, E.-M. (2020). Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20(4), 2141-2154.
- Dubey, R. S. (2016). Photosynthesis in plants under stressful conditions. In M. Pessaraki (Ed.), *Handbook of photosynthesis* (3rd ed., pp. 629-650). CRC Press.
- Eid, E. M., Khedher, K. M., Ayed, H., Arshad, M., Mouldi, A., Shaltout, K. H., Sewelam, N. A., Galal, T. M., El-Bebany, A. F., & Alshehri, A. M. A. (2020). Prediction models based on soil properties for evaluating the heavy metal uptake into *Hordeum vulgare* L. grown in agricultural soils amended with different rates of sewage sludge. *International journal of environmental health research*, 1-15.
- Engwa, G. A., Ferdinand, P. U., Nwalo, F. N., & Unachukwu, M. N. (2019). Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans. In O. Karcioğlu & B. Arslan (Eds.), *Poisoning in the Modern World: New Tricks for an Old Dog?* (pp. 77-100). IntechOpen.
- Filip, S., Popov, S., Šorgić, S., & Đurović, S. (2022). Analytical Techniques For Analysis of Metals and Minerals in The Soil Samples. *Recent Advances in Analytical Techniques: Volume 5*, 5, 159-191.
- Hauggaard-Nielsen, H., Andersen, M. K., Jornsgaard, B., & Jensen, E. S. (2006). Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Research*, 95(2), 256-267.
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 366-381.
- Jerbi, M., Labidi, S., Laruelle, F., Tisserant, B., Dalpé, Y., Lounès-Hadj Sahraoui, A., & Ben Jeddi, F. (2022). Contribution of Native and Exotic Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Improving the Physiological and Biochemical Response of Hulless Barley (*Hordeum vulgare* ssp. nudum L.) to Drought. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M. J., Brestic, M., Zhang, X., & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 222, 112510.
- Khazaei, M., Galavi, M., Dahmarde, M., Moosavi-Nik, S. M., Zamani, G. R., & Mahdi-Nejad, N. (2016). Effect of drought stress on osmolyte accumulation, photosynthetic pigment and growth of three Foxtail Millet (*Setaria italica* L.) species. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(2), 149-162, In Farsi.
- Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2019). *Plant Physiological Ecology*. Springer International Publishing.
- Liu, X., Ouyang, W., Shu, Y., Tian, Y., Feng, Y., Zhang, T., & Chen, W. (2019). Incorporating bioaccessibility into health risk assessment of heavy metals in particulate matter originated from different sources of atmospheric pollution. *Environmental Pollution*, 254, 113113.
- Lopez, A. M. Q., Silva, A. L. D. S., Maranhão, F. C. D. A., & Ferreira, L. F. R. (2022). Plant Growth Promoting Bacteria: Aspects in Metal Bioremediation and Phytopathogen Management. In A. Kumar (Ed.), *Microbial Biocontrol: Sustainable Agriculture and Phytopathogen Management: Volume 1* (pp. 51-78). Springer International Publishing.
- Luo, J.-S., & Zhang, Z. (2021). Mechanisms of cadmium phytoremediation and detoxification in plants. *The Crop Journal*, 9(3), 521-529.
- Macnicol, R. D., & Beckett, P. H. T. (1985). Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant and Soil*, 85(1), 107-129.
- Mahmoud, A. W. M., Hassan, A. Z. A., Mottaleb, S. A., Rowezak, M. M., & Salama, A. M. (2021). The Role of Nano-Silicon and Other Soil Conditioners in Improving Physiology and Yield of Drought Stressed Barley Crop. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 67(3), 124-143.
- Marjovvi, A., & Mashayekhi, p. (2020). Chemical Effect of municipal Compost and Sewage Sludge on Soil and Wheat Crop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(9), 2349-2363, In Farsi.
- Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khurshed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2021). Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1321-1335.
- Pal, R., & Kundu, R. (2016). Risk Assessment of Some Selected Vegetables Grown in Metal Contaminated Soil Supplements. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 86(3), 585-593.

- Peng, L., Luo, S., Xiong, L., & Sun, H. (2021). The Absorption and Distribution of Heavy Metals of Dominant Plant for Ecological Restoration of Stone Coal Mine. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 4694528.
- Romdhane, L., Dal Ferro, N., Slama, A., & Radhouane, L. (2020). Optimizing irrigation and determining the most sensitive development stage to drought in barley (*Hordeum vulgare* L.) in a semi-arid environment. *Acta botanica Croatica*, 79(1), 87-94.
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F. A., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought Stress Tolerance in Wheat and Barley: Advances in Physiology, Breeding and Genetics Research. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(13), 3137.
- Saravanan, A., Jeevanantham, S., Narayanan, V. A., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., & Muthu, C. M. M. (2020). Rhizoremediation – A promising tool for the removal of soil contaminants: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103543.
- Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ullah, M. S., Ahmad, N., & Umar, U. (2020). Individual and combined effect of terminal drought and heat stress on allometric growth, grain yield and quality of bread wheat. *Pak. J. Bot.*, 52(2), 405-412.
- Shafaqat, A., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-DAIM, M. M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., & Kalderis, D. (2020). Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water: A Review. *Sustainability*, 12(5), 1927.
- Shanmugaraj, B. M., Malla, A., & Ramalingam, S. (2019). Chapter 1 - Cadmium Stress and Toxicity in Plants: An Overview. In M. Hasanuzzaman, M. N. V. Prasad, & M. Fujita (Eds.), *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants* (pp. 1-17). Academic Press.
- Shumayla, & Upadhyay, S. K. (2022). Chapter 9 - Mechanism of iron uptake and homeostasis in plants. In S. K. Upadhyay (Ed.), *Cation Transporters in Plants* (pp. 147-165). Academic Press.
- Silva-Yumi, J., Escudey, M., Gacitua, M., & Pizarro, C. (2018). Kinetics, adsorption and desorption of Cd(II) and Cu(II) on natural allophane: Effect of iron oxide coating. *Geoderma*, 319, 70-79.
- Sleimi, N., Bankaji, I., Kouki, R., Dridi, N., Duarte, B., & Caçador, I. (2022). Assessment of Extraction Methods of Trace Metallic Elements in Plants: Approval of a Common Method. *Sustainability*, 14(3), 1428.
- Souri, M. K., Hatamian, M., & Tesfamariam, T. (2019). Plant growth stage influences heavy metal accumulation in leafy vegetables of garden cress and sweet basil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6(1), 25.
- Yusefzaee, f., & pourakbar, I. (2017). The Effect of copper Nanoparticles and Copper chloride solution On Germination And solution some morphological and physiological factors *Ocimum basilicum* L. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 30(1), 221-231.